

Una apreciación sistemodinámica de Gaia

Joaquín Medín Molina

Departamento de Física, Universidad de Puerto Rico, Bayamón
Bayamón, Puerto Rico
jmedin@prtc.net

Resumen

En estas breves reflexiones sobre el pensamiento de sistemas dinámicos y en particular sobre la ponencia de Tyler Volk el profesor Medín trata de transparentar como es que el pensamiento de sistemas dinámicos se configura en la teoría Gaia y en algunas de sus implicaciones más generales. Le motiva saber que en nuestra cultura el pensamiento de sistemas dinámicos se cultiva muy exiguamente todavía y por consiguiente no hay muchos ejemplos teóricos o aplicados a problemas acuciantes del país. Presenta sus comentarios con miras a poder estimular al lector a hurgar más en ese pensamiento. Se explica el modelo “Daisyworld”, conocido en español como mundo de las margaritas y como se puede entender el mecanismo de Gaia ilustrado en “Daisyworld” desde la perspectiva de la sistemodinámica por medio de tres ideas fundamentales de este pensamiento.

Palabras claves: Gaia, sistemas dinámicos, “Daisyworld”, Mundo de las Margaritas, Tyler Volk.

Abstract

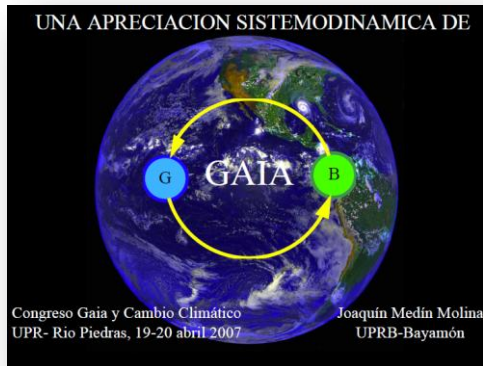
In this brief reflection of the topic of dynamic systems and of Tyler Volk’s essay; professor Medin tries to reveal how thought of the dynamic system is configurated in the theory of Gaia. He is especially interested in the fact that in our culture the thought of dynamic systems is barely cultivated and by consequence it is not used to solve the problems affecting the country. His aim when presenting his commentaries is to stimulate the reader and to provoke interest in the thought of dynamic systems. He explains the computer simulation “Daisyworld” and how the Gaia mechanism illustrated in “Daisyworld” can be understood through the perspective of system dynamics and the three fundamental ideas of this system thinking.

Keywords: Gaia, dynamic systems, Daisyworld, Tyler Volk.



Introducción

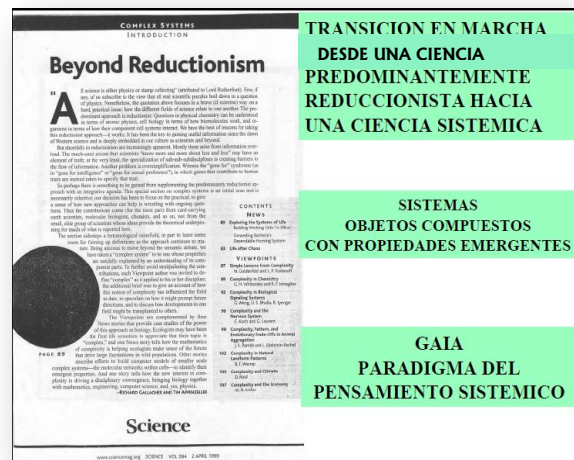
El pensamiento de sistemas dinámicos pertenece sin duda a la matriz intelectual de la temática de estas memorias. En estas breves reflexiones sobre esa temática y en particular sobre la ponencia de Tyler Volk trato de transparentar como es que el pensamiento de sistemas dinámicos se configura en la teoría Gaia y en algunas de sus implicaciones más generales. Me motiva saber que en nuestra cultura el pensamiento



de sistemas dinámicos se cultiva muy exiguamente todavía y por consiguiente no hay muchos ejemplos teóricos o aplicados a problemas acuciantes del país. En la medida en que mis comentarios puedan estimular a los presentes a hurgar mas en ese pensamiento creo que habré utilizado bien el valioso tiempo que se me ha concedido.

El periodo más excitante de la historia humana es en muchos respectos el presente. Nunca antes la vida humana había estado cambiando tan rápido y de tantas maneras fascinantes. Estamos en un momento de múltiples transiciones pero de mínimas certezas. Algunos estudiosos proponen que recién entramos en el antropoceno, una nueva época geológica en la que el Homo Sapiens asume control de su propia evolución y ejerce por vez primera una influencia decisiva sobre los ecosistemas planetarios y el clima. Una influencia que puede llevarnos a un cataclismo global o a un mundo radicalmente diferente al que hemos conocido. Lo que suceda dependerá de lo que hagamos en los años venideros, puesto que cada uno de nosotros creará una pequeña pieza de ese futuro compartido. Interesa que para construir un futuro que merezca ser vivido reconozcamos hoy una necesidad que no puede ser secundaria de ninguna otra: la necesidad de reaprender a vivir bien acoplados a la Tierra. Este reconocimiento supone una reorientación de la visión científica del mundo y de la educación que la difunde.

En la historia de la ciencia occidental las formas holísticas y reduccionistas de pensar se han alterado. En la antigüedad el pensamiento científico era holístico pero especulativo. El temperamento científico moderno reaccionó convirtiéndose en empírico pero reduccionista. Ninguno de los dos está libre de error, el holismo porque ignora las partes y sustituye la investigación por la fe y la intuición; y el reduccionismo porque sacrifica la coherencia en el altar lo fáctico y pierde de vista la unidad esencial de la realidad en la búsqueda de fragmentos. Hoy somos testigos de un nuevo desplazamiento: el desplazamiento hacia teorías rigurosas pero holísticas. Tómese como referencia el ejemplar monográfico de la revista “Science” titulado “Science: Beyond Reductionism. April 2, 1999, Science 284”. Esto significa pensar el mundo en el contexto de sistemas, los cuales son objetos integrados que poseen propiedades emergentes (propiedades como la vida de una célula que no la poseen las partes pero que surgen de la interacción entre estas partes) Ver la realidad como una red integrada por sistemas dinámicos en múltiples escalas de espacio y de tiempo constituye la visión sistémica del mundo. El desarrollo de esa visión en constante lucha contra la fragmentación es posiblemente el gran proyecto intelectual de este siglo. Igual que los problemas de la democracia se resuelven con más democracia, los problemas creados por el avance de la ciencia reduccionista se están resolviendo con más ciencia, no rechazando la ciencia. No obstante no es cualquier tipo de ciencia, sino una ciencia con fines y métodos renovados, una ciencia que refuerza más que nunca antes las integraciones. Por eso en las fronteras de la ciencia y del arte quienes se destacan cada vez más no son los polemistas de antaño o quienes buscan continuamente romper con viejos moldes, sino los sintetizadores. Enfrentados a la encrucijada histórica en la relación del ser humano con la naturaleza, los sintetizadores desarrollan propuestas teóricas y prácticas que sirven para unificar en vez de enajenar al ser humano de la naturaleza.



Una propuesta fecunda e ilustrativa de aspectos medulares del pensamiento sistémico es lo que originalmente se llamó la hipótesis Gaia de James Lovelock y Lynn Margulis y que hoy día se designa por nombres diversos como ciencia de geosistemas, fisiología terrestre u homeostasis planetaria. La presentación de Tyler Volk en este congreso es una muestra fehaciente de la vitalidad científica del programa de investigación iniciado por esa propuesta. En su primera formulación Lovelock y Margulis sostenían que el binomio formado por la biota y la geósfera (compuesta por la atmósfera, los océanos y los suelos) funciona como un superorganismo que se autoregula. El colectivo de seres vivos no solo se adapta a su ambiente físico sino que cambia activamente este ambiente (Por ejemplo: temperatura y composición de la atmosfera) para mantenerlo en condiciones habitables por los seres vivos. Esta idea parece absurda en primera instancia: ¿Cómo es posible que un planeta este vivo si está compuesto casi en su totalidad de roca mayormente derretida y la parte obviamente con vida (biosfera) forma una capa quinientos veces más fina que el planeta? Sin embargo considérese que un árbol de ceiba centenario está vivo aun cuando el 99% de su masa es madera muerta. Al igual que la Tierra, la ceiba tiene una piel de tejido vivo dispersa tenuemente en su superficie.

HIPOTESIS GAIA INICIAL
(J. LOVELOCK, NATURE, 1965
(J. LOVELOCK & L. MARGULIS, TELLUS, 1973)

**LA BIOSFERA Y EL CLIMA FUNCIONAN
COMO UN SUPERORGANISMO QUE SE
AUTOREGULA**

**ALCANCES Y LIMITES DE METAFORA DE BIOSFERA
COMO SUPERORGANISMO**

propiedad	organismo	biosfera
respiracion	SI	SI
metabolismo	SI	SI
autoregulación	SI	SI
reproducción	SI	NO
reciclaje	NO	SI
Evolución por Selección natural	SI	NO

“GAIA” ES UNA METAFORA CON VALOR COMUNICATIVO Y LIMITACIONES IGUALES QUE LAS QUE TIENEN “HUECO NEGRO” Y “GEN EGOISTA”

La idea de que la Tierra está viva es tan vieja como la raza humana. Es parte de la sabiduría popular de sociedades tradicionales, en particular de pueblos indígenas. Hasta el siglo 19 los científicos se sentían cómodos con esa noción. Lovelock revive la vieja idea de la Tierra como un organismo luego de reconocer que la actividad general de un planeta es un buen indicador de la vida en el planeta. Aunque no existe consenso entre los biólogos para definir la vida, en general se aceptan al menos las siguientes propiedades como esenciales para la vida: respiración, metabolismo, autoregulación, irritabilidad, y reproducción. Se puede decir que la Tierra posee todas estas propiedades excepto la última. Los organismos tampoco reciclan sus propios desperdicios como lo hace la Tierra. Por consiguiente el concepto de Gaia debe verse como una metáfora de alcance limitado como toda metáfora, pero sugerente de una idea científica que ayuda a su divulgación en la misma medida que lo hacen la metáfora del hueco negro en la Física y del gen egoísta en la Biología evolutiva. Esta, a mi mejor entender ha sido la postura de Lovelock y Margulis para quienes lo fundamental siempre ha sido la idea de autoregulación y no la de la Tierra como un superorganismo.

La Tierra ha persistido como un lugar propicio para la vida durante los pasados 3.5 billones de años desde que la vida comenzó, a pesar de que el sol ha cambiado y ahora genera un 30% más calor. La atmósfera es una mezcla inestable de gases reactivos, sin embargo su composición permanece constante y respirable por los eones, sin importar quiénes son sus habitantes. Esa capacidad de la Tierra es análoga a una capacidad básica de los organismos: la homeostasis o capacidad para regular su ambiente interior. Los organismos siempre se han adaptado activamente a su ambiente preservándolo para hacer posible la vida. La hipótesis Gaia se inspira en esa adaptación activa para concebir la evolución de las especies junto a la evolución física y química como un solo e indivisible proceso evolutivo. Con esta propuesta está sucediendo lo que le ha ocurrido a otras ideas importantes: primero es ridiculizada, luego es resistida y eventualmente es incorporada al fondo de conocimientos aceptados. En la declaración de Ámsterdam de 2001 mas de mil científicos firmaron un pronunciamiento que en su primera oración dice: "El sistema de la Tierra se comporta como un sistema singular que se auto regula constituido por componentes físicos,

químicos, biológicos y humanos”. Estas palabras apuntan a un cambio notable tanto en los biólogos que tradicionalmente pensaban que los organismos se adaptan pero no cambian su ambiente y los científicos terrestres que tradicionalmente pensaban que fuerzas geológicas exclusivamente podrían explicar la evolución de la corteza, la atmósfera y de los océanos.

Como es usual en la ciencia, las objeciones científicas a la hipótesis Gaia han ejercido un efecto saludable en su desarrollo. Una de las objeciones importantes se apoyó en la teoría de la evolución.

El argumento es el siguiente: la Tierra no puede ser un superorganismo que se autoregula porque las propiedades orgánicas surgen solamente mediante la selección natural. La selección natural no existe ni puede existir en el caso de la Tierra pues la Tierra ha sido siempre la misma entidad. No hay entonces un mecanismo

STATUS CIENTIFICO ACTUAL DE GAIA
DECLARACION DE AMSTERDAM (2001)

“El sistema de la Tierra se comporta como un sistema singular que se **auto regula** constituido por componentes físicos, químicos, biológicos y humanos” primera oración de declaración

- CIENCIA DE SISTEMAS TERRESTRES
- GEOFISIOLOGIA
- HOMEOSTASIS PLANETARIA

•OBJECCION EVOLUTIVA A GAIA
(R.DAWKINS&F. DOOLITTLE,1979)

- Los organismos individuales son la unidad de seleccion natural y no la tierra que es ser único que no se reproduce
- No existe mecanismo concebible de **evolucion** por seleccion natural o de otra indole mediante el cual los organismos puedan desarrollar la capacidad de regular su ambiente
- Gaia reabre las puertas a la teleologia: ia autoregulacion como un proposito deliberado de los seres vivos o de algun creador sobrenatural.

RESPUESTA DE LOVELOCK : DAISYWORLD(1981)

Construir un modelo en el que presenta un mecanismo que produce autoregulacion como una propiedad que emerge por **coevolucion** de los organismos y su ambiente representado por la temperatura.

mediante el cual la biosfera pueda crear y mantener condiciones óptimas para sí misma a menos que se piense que la biosfera ha sido diseñada sobrenaturalmente o tiene capacidad teleológica de comportarse con propósitos altruistas. Lovelock respondió a esta objeción proponiendo un mecanismo que plasmó en

su modelo “Daisyworld”. El modelo demuestra como la autoregulación puede surgir como una propiedad emergente de la biosfera en interacción con la geosfera sin necesidad de invocar diseño, virtudes teleológicas o selección natural.

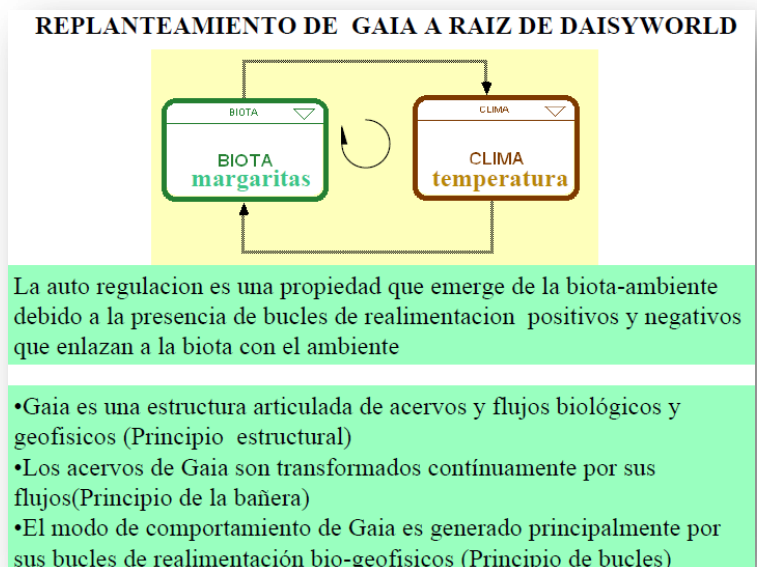
El propósito de “Daisyworld” no es negar que la selección natural ocurra, ni que tenga efectos importantes, sino poner al descubierto lo que se puede lograr sin selección natural. El modelo se simplificó todo lo posible para ilustrar con la mayor claridad posible como surge la autoregulación. No se presentó como un modelo de la Tierra real, pero apela a principios físicos y procesos similares a los que probablemente regulan nuestro ambiente. La explicación científica de la hipótesis Gaia brindada por el modelo “Daisyworld” disuelve el misterio pero no necesariamente la maravilla de Gaia; “Daisyworld” ilustra que un modelo de algo complejo no tiene que ser barroco, puede ser parsimonioso y capturar lo esencial del sistema complejo modelado. En su autobiografía publicada recientemente, Lovelock sostiene que “Daisyworld” es su principal aportación al desarrollo científico de la hipótesis Gaia. En efecto, visto con el prisma de la teoría de sistemas dinámicos en su modalidad conocida como sistemodinámica, el modelo “Daisyworld” es un ejemplar digno de emular y estudiar.



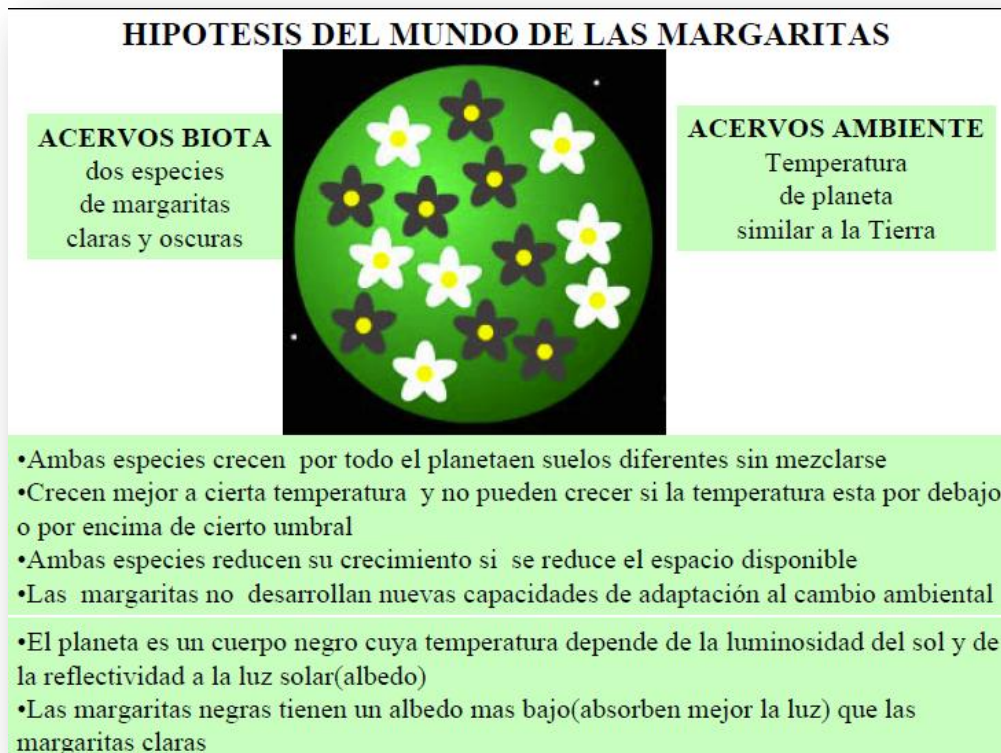
Desde la perspectiva de la sistemodinámica hay tres ideas fundamentales que ayudan a entender el mecanismo de Gaia ilustrado en “Daisyworld”. Estas ideas se desprenden de la analogía que sirvió de fuente de inspiración a la sistemodinámica: (1) todo sistema dinámico es análogo a un sistema hidráulico de tanques o vasos comunicantes, (2) el estado de un sistema está constituido por sus acervos variables que son análogos al agua acumulada en los vasos y (3) los acervos del sistema cambian debido a flujos que son procesos análogos a los flujos de agua que llenan y vacían los vasos en el sistema hidráulico. Los flujos son a su vez controlados en última instancia por los acervos, lo que es análogo a que se regule el flujo de agua entre los vasos comunicantes de acuerdo con el agua acumulada en los vasos. Este planteamiento implica que los sistemas dinámicos tienen una estructura de acervos o variables acumulativas y de flujos o variables de procesos. Los acervos solo pueden ser cambiados por sus respectivos flujos y el comportamiento del sistema está determinado por los bucles de realimentación que vinculan en relaciones de causalidad circular las variables de acervos y de flujos de los sistemas.

Si postulamos que la Biosfera es un sistema dinámico entonces la biosfera tiene una estructura de niveles y flujos articulados en bucles de realimentación.

La hipótesis Gaia puede replantearse así: la regulación del ambiente (Por ejemplo: temperatura, composición de la atmósfera, composición del suelo, etc.) a un estado habitable ocurre debido a la presencia de bucles de realimentación biogeofísicos que vinculan causalmente los acervos de la biota con acervos del ambiente.



Veamos específicamente como este planteamiento se hace explícito en “Daisyworld”. Que de ahora en adelante llamaremos también el mundo de las margaritas. El mundo de las margaritas es un planeta hipotético que gira alrededor de una estrella como nuestro sol y en una órbita similar a la de la Tierra. Toda la biota consiste de dos especies de margaritas que difieren solamente en una característica: una especie es blanca y la otra especie es negra. Esto simplifica el modelo al reducir las posibles interacciones entre las especies lo que nos permite apreciar mejor el efecto de autoregulación estudiado. Las margaritas crecen en suelos distintos sin mezclarse. Ambas especies crecen mejor a una temperatura determinada igual para ambas y no pueden crecer y reproducirse si las temperaturas están por debajo o exceden ciertos umbrales. Las margaritas también se ven afectadas por el hacinamiento, de suerte que a medida que su población crece se difunden a regiones no ocupadas del planeta, pero según se va reduciendo el espacio disponible, se reduce su crecimiento. Como es natural las margaritas también se mueren y si mueren más rápido que lo que crecen, el área que ocupan disminuye. La población de margaritas claras y oscuras son los acervos de la biota de “Daisyworld” y sus procesos de crecimiento y mortalidad son sus único flujos.

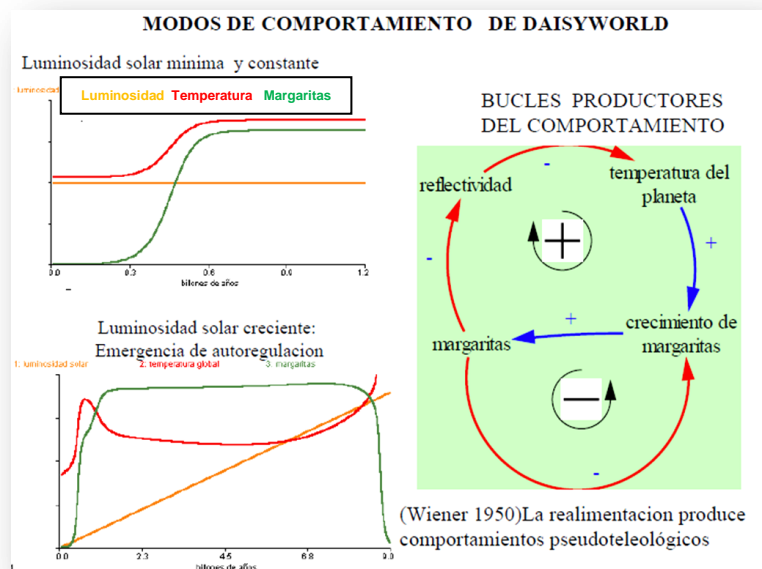


El ambiente en el mundo de las margaritas está representado por un único acervo: la temperatura. La temperatura depende de la luminosidad del sol y del albedo o reflectividad a la luz solar del planeta. Las margaritas negras tienen un albedo más bajo y por tanto absorben más luz que la tierra yerma sin margaritas. En consecuencia un planeta cubierto por margaritas negras es un planeta más cálido que un planeta sin vida. Un planeta cubierto con margaritas blancas que tienen un albedo superior será un planeta más fresco. Cuando ambas especies existen a la vez es más caluroso el lugar donde están las margaritas negras que el lugar donde se encuentran las blancas.

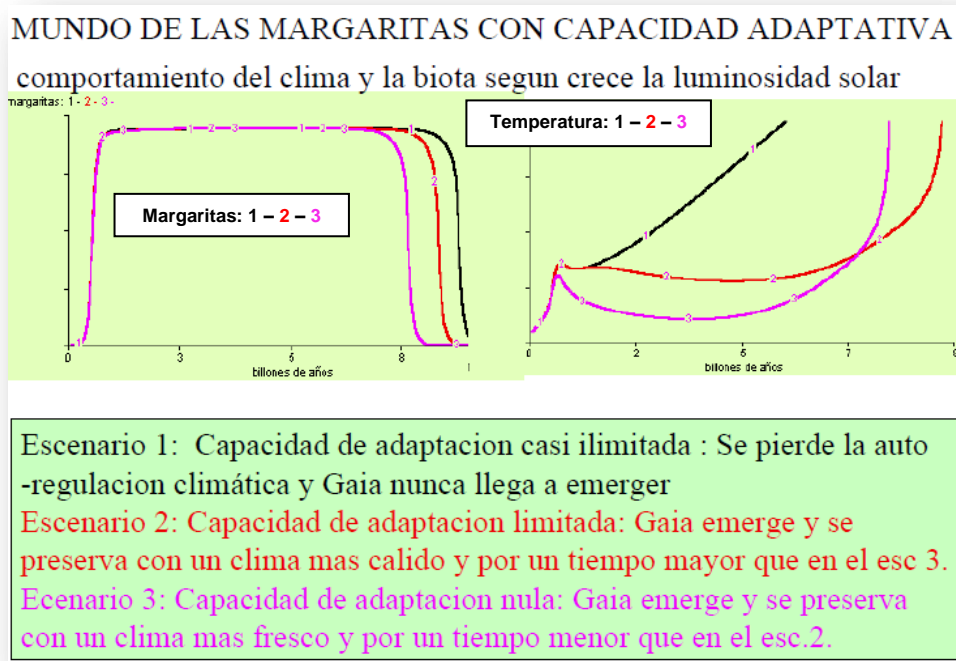
Con estas propiedades ordinarias el sistema dinámico formado por las margaritas y su ambiente tiene unas consecuencias dinámicas sorprendentes cuando se formaliza y simula en una computadora.

Si las margaritas negras aparecen en un planeta frío pero que es suficientemente caliente para que ellas puedan crecer, estas crecerán, reducirán el albedo y harán más caliente el planeta. El calentamiento del planeta favorecerá que las margaritas oscuras crezcan aún

más, lo que reducirá el albedo y calentará más el planeta, etc. Sistemodinámicamente esto significa que un bucle de realimentación reforzante o positivo que vincula la biota y el ambiente asume dominancia en el control del comportamiento del sistema. Esta situación no persiste indefinidamente porque hay progresivamente menos espacio para la expansión de las margaritas y esa limitación de espacio frena su crecimiento, es decir simultáneamente con el bucle positivo hay un bucle de realimentación negativo que gradualmente se va fortaleciendo hasta llegar a ser dominante. Eventualmente se alcanza un equilibrio en el que la población de margaritas se estabiliza.



Al mismo tiempo la temperatura del planeta también se estabiliza a un valor bien por encima del valor que tendría si no hubiera margaritas. Lo más asombroso ocurre si permitimos que la luminosidad del sol aumente en una medida significativa. En este escenario se observa que ni la población de margaritas ni la temperatura varían significativamente en un rango amplio de variación de la luminosidad. Esto revela que el modelo exhibe la propiedad esencial de un sistema gaiano: su capacidad de autoregulación. No es muy difícil ver por qué sucede esto. Hay dos influencias en el crecimiento de la población de margaritas: (1) la influencia de la temperatura ocurre en un bucle de realimentación positivo y (2) la influencia limitante del espacio se da en un bucle de realimentación negativo. La combinación de ambos bucles conduce a la autoregulación climática y biológica en “Daisyworld”: el clima ,representado por la temperatura, se estabiliza por la acción de la vida en un valor que le es favorable a la vida y todo ocurre sin la intervención de fuerzas misteriosas. No existe ninguna razón para acudir a la selección natural como explicación de los bucles de realimentación. No es difícil entender porque las plantas crecen mejor a ciertas temperaturas y porque crecen menos cuando hay más hacinamiento. En consecuencia la autoregulación, una propiedad fundamental de los organismos aparece sin ser producto de la selección natural. La autoregulación no es una propiedad de las margaritas sino que es una propiedad emergente de este mundo de margaritas formado por la biota y el clima.



Estos resultados siguen siendo válidos cuando se hacen modificaciones razonables al modelo. Por ejemplo si se introduce la selección natural para facultar a las margaritas a evolucionar en sus capacidades de adaptación a la temperatura, el modelo reduce el ámbito de autoregulación, pero no destruye esa propiedad. Esto demuestra de paso que “Daisyworld” no es incompatible con la teoría de la evolución darwiniana, como debe ser, pues toda hipótesis científica debe ser evaluada con el prisma del conocimiento científico establecido antes de ser aceptada. “Daisyworld” demuestra algo que era y es muy conocido dentro de la pequeña comunidad de especialistas en sistemas dinámicos desde los años 50: un sistema dinámico con realimentación se comporta como si tuviera un propósito que le trasciende. En lenguaje aristotélico esto es equivalente a decir que hay sistemas que operan con causas eficientes pero que su comportamiento parece estar determinado por causas finales.

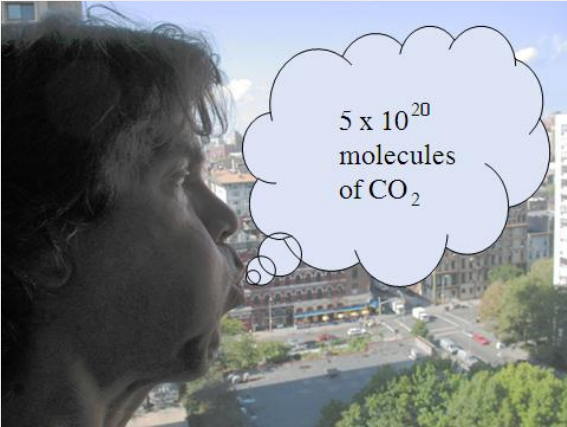
Otra enseñanza tradicional sistemodinámica que se reitera en el proceso de modelar y simular a “Daisyworld” es la realidad de la desigual capacidad humana para entender la estructura de los sistemas y sus modos de comportamiento. Es mucho más accesible a nuestro cerebro captar la relación entre las partes de “Daisyworld” (estructura) que comprender las consecuencias dinámicas de esa estructura (comportamiento autoreglativo). El devenir en el tiempo de los sistemas con realimentación suele contener aspectos sorprendentes que habitualmente solo podemos descubrir después de su simulación. Por eso la consigna en la sistemodinámica siempre ha sido: dejar que el cerebro y la computadora hagan lo que cada cual hace mejor: el cerebro conceptualiza la estructura de los sistemas dinámicos y la computadora pone al descubierto mediante simulación las consecuencias dinámicas de esas estructuras.

En la biosfera sucede como en “Daisyworld” que las partes están conectadas a todas las demás partes en bucles de realimentación, por tanto lo que sucede en un sitio afecta a los demás sitios, lo que se hace ahora afecta a lo que sucede después y cada cosa va a algún lugar. Vea el siguiente ejercicio matemático como ejemplo.

El siguiente ejercicio de aritmética atmosférica permite ver que la profunda interconexión entre las partes en Gaia también existe a raíz de las condiciones fisicoquímicas de la atmósfera. Un ser humano adulto respira 400cc de aire en cada respiración que contienen 10 sextillones (10^{22}) moléculas de aire. La atmosfera consiste de 100 sextillon de sextillones (10^{44}) de moléculas, por tanto una molécula tiene la misma relación con una respiración que lo que esta tiene con la atmosfera, ambas son de 1 a 10 sextillones. Si suponemos que la ultima exhalación de cualquier humano particular (sea quien sea) se ha dispersado por toda la atmósfera, la situación es tal que cada uno de nosotros inhala una molécula que perteneció a ese humano particular cada vez que respiramos. Como los pulmones tienen 2000cc de aire, hay unas 5 moléculas del último suspiro de ese humano en cada pulmón humano.

Eso asegura que los procesos son cíclicos y los desperdicios de un proceso son nutrientes en otro proceso como lo ha expresado Tyler Volk en su ponencia. Gaia, sin su componente humano, no es un sistema en crecimiento y se asemeja a lo que se conoce como un sistema en estado estacionario. Las plantas toman bióxido de carbono del aire y nitratos del suelo y son comidas por los animales que excretan el bióxido de carbono al aire y

compuestos orgánicos al suelo que luego son convertidos por los microorganismos en nitratos. En nuestro sistema de producción, en cambio, los procesos han sido y son predominantemente lineales, producen desperdicios que ya rebasan en muchas instancias las capacidades asimilativas de Gaia y han aumentado exponencialmente en su escala sin reconocer límites al crecimiento.



BIOCHEMICAL GUILDS

Some Examples —

for Carbon —

- light, CO₂ → photosynthesizers → CH₄ → methane producers → CO₂ → respirers → CO₂

for Nitrogen —

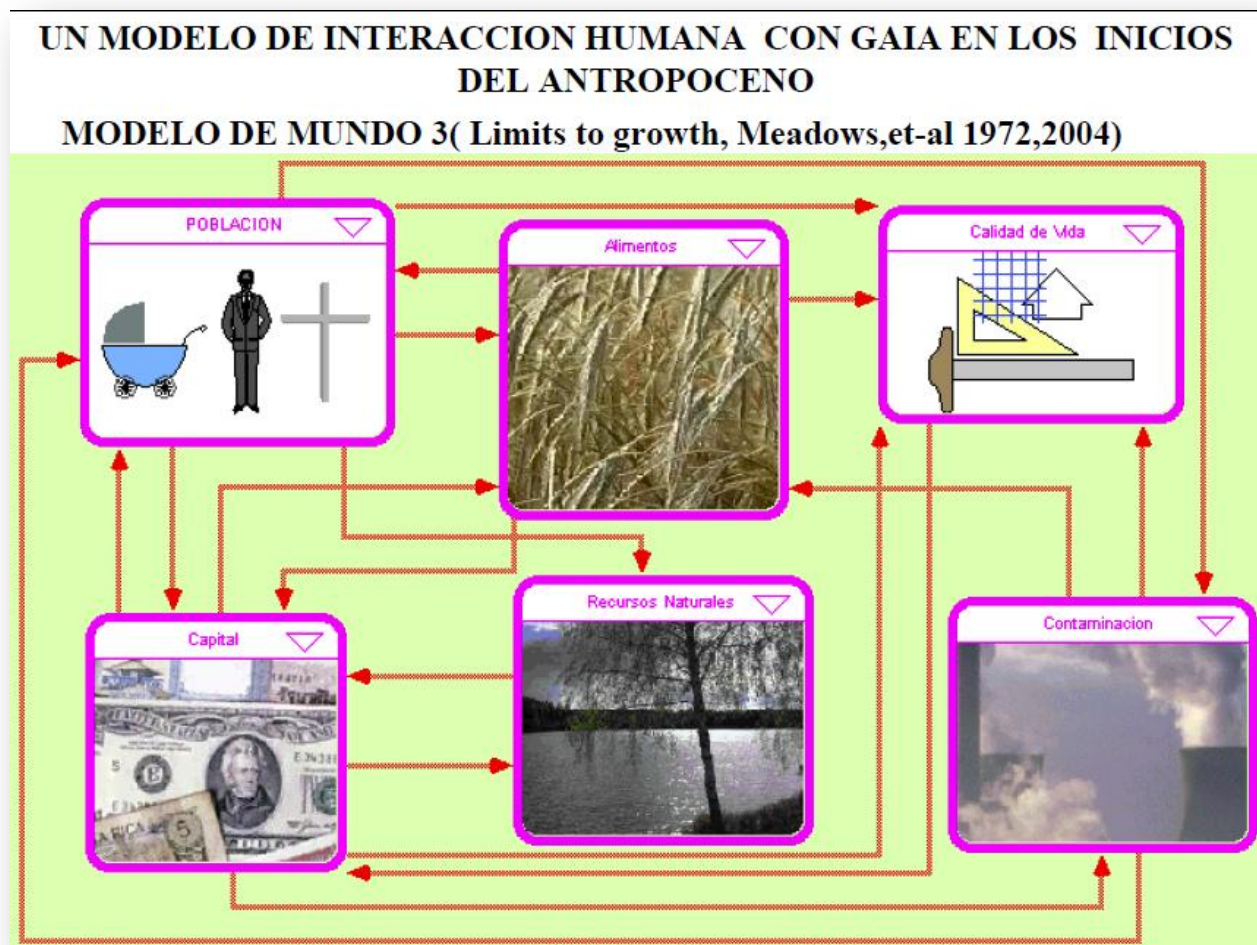
- N₂ → nitrogen fixers → NH₄ → nitrifiers → NO₃ → denitrifiers → N₂ → nitrogen fixers

for Sulfur —

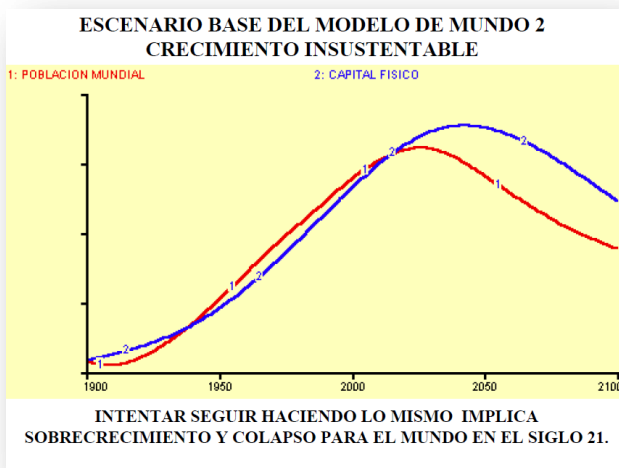
- H₂S → sulfide oxidizers → SO₄ → sulfate reducers → H₂S → sulfide oxidizers

Imágenes tomadas de la presentación de Tyler Volk con autorización del editor.

Hace casi 40 años los pioneros de la sistemodinámica se construyeron los primeros modelos en que se intentaba empezar a entender las consecuencias dinámicas a largo plazo de las interacciones que ha establecido la sociedad humana moderna con su medio ambiente. El producto de esos esfuerzos fue el llamado modelo de mundo, auspiciado en sus orígenes por el Club de Roma. Este modelo contiene variables demográficas, económicas, sociales, agrícolas, ambientales y de recursos naturales en un entramado de bucles de realimentación que reflejan el conocimiento de la docena de especialistas que intervinieron en su elaboración. Pienso que ese esfuerzo produjo algo similar en valor al modelo “Daisyworld” en relación con Gaia, pero esta vez como esfuerzo pionero para capturar la naturaleza esencial del predicamento humano en relación con Gaia.



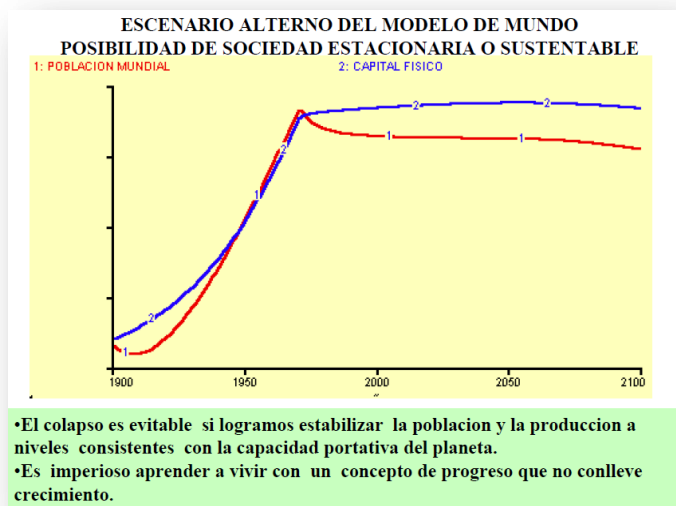
La conclusión fundamental de este modelo en sus diferentes versiones fue que seguir haciendo lo mismo que hemos venido haciendo los humanos implica en el siglo 21 un sobre crecimiento y colapso en los acervos de población y de capital económico, es decir que el crecimiento actual era insustentable en un plazo de tiempo históricamente breve. Lo más interesante de esta conclusión no es meramente que



tenga mucha más aceptación hoy que la que tuvo entonces sino que el replanteamiento del problema al cual conduce inevitablemente ha tenido mucho menos aceptación.

En el modelo se encuentra que lo que conduce al sobre crecimiento y al colapso son la dominancia de los bucles de

realimentación positivos en el crecimiento de los acervos de población humana y del capital económico. El colapso se puede evitar y se puede lograr una transición hacia una solución global sustentable si reducimos la ganancia de esos bucles. Esto exige que, reconozcamos que el crecimiento poblacional y económico no son la solución sino la esencia del problema. Quisiera recalcar en este punto que el tipo de pensamiento que llevó a Lovelock a reformular su hipótesis Gaia luego de la experiencia con “Daisyworld” es el mismo aplicado aquí, a saber: el modo de comportamiento de un sistema dinámico complejo está determinado por su estructura de bucles de realimentación dominantes.



El concepto de desarrollo sustentable, según definido por la famosa comisión Brundland de 1987, que plantea satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas, es incompatible con Gaia y con los modelos de Mundo en la medida que admite un crecimiento indefinido de los acervos materiales físicos del sistema productivo. Sabiamente los pioneros de este pensamiento (Ehrlich, Forrester, Daly) hablaron no de desarrollo sustentable sino de **sociedad sustentable**: aquella en que los acervos materiales (población, capital físico) permanecen en estado estacionario. Lo que puede y debe seguir desarrollándose en la sociedad sustentable son los acervos culturales, de capital social, de información, de conocimiento y de valores humanos.

En todo caso no podemos vivir en Gaia de modo sustentable con el “estilo de vida estadounidense que el grueso de la población mundial parece querer imitar”. Necesitaríamos tener los recursos de al menos siete Gaias para vivir equitativamente al estilo de EU con una huella ecológica que brinde esperanzas bien justificadas de sustentabilidad. Eso no es posible ni al presente ni en el futuro previsible pues desde hace algún tiempo sabemos que con la singular excepción de la Tierra el Sistema solar es un lugar hostil e inhóspito para la vida.

PREDICAMENTO HUMANO EN LOS INICIOS DEL ANTROPOCENO DE GAIA

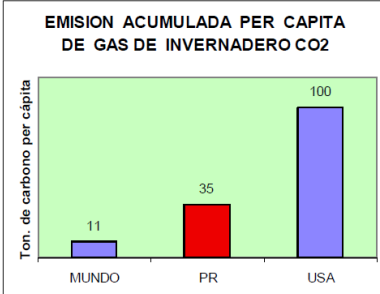
Potencia de la economía mundial $\approx 10^{13}$ vatios
Huella ecológica global $\cong 1.20$ planetas Tierra
Potencia de la economía de USA $\cong .27 * 10^{13}$ vatios
Si la economía mundial tuviese el nivel de consumo de USA :
 \Rightarrow Potencia de la economía mundial $\cong 6 * 10^{13}$ vatios
Huella ecológica global $\cong 7$ planetas Tierra

En consecuencia es imposible que la Humanidad pueda alcanzar de modo sustentable los niveles de consumo de USA. Si el consumo de energía continúa su ritmo ascendente es inevitable un colapso ecológico planetario

La autoregulación gaiana surge de la actividad local de organismos individuales. Para nosotros esto ratifica la conocida exhortación a que pensemos globalmente y actuemos localmente. Nuestra acción local debe ser conmensurable con nuestra responsabilidad. Nuestra responsabilidad con Gaia de cara al problema climático no

debe buscarse en nuestra contribución al flujo presente de gases de efecto invernadero sino en nuestra contribución acumulativa al acervo presente de gases de efecto invernadero de origen antropogénico. Este índice se conoce como el índice de deuda natural. Hemos calculado este índice para Puerto Rico usando un modelo sistemodinámico. Si consideramos la emisión acumulativa de gases de invernadero generados por la actividad económica a partir del año 1900 y luego de tomar en cuenta los tiempos de residencia en la atmósfera obtenemos el siguiente resultado: para Puerto Rico esa deuda es de treinta y cinco (35) toneladas equivalentes de CO₂ por cada puertorriqueño viviente. Esto es tres (3) veces más que el promedio mundial de once (11) toneladas equivalentes de CO₂, aunque casi tres veces menos que la deuda por cada estadounidense vivo de cien (100) toneladas equivalentes de CO₂. A un costo de remoción del CO₂ de la atmósfera de tres (3) centavos por libra de CO₂ removido (una cifra conservadora, pero suficiente para este propósito) la deuda ascendería a nueve (9) billones de dólares para todo Puerto Rico. Esto es comparable con la deuda pública económica del gobierno central y los municipios. Este cálculo nos permite concluir que si pensamos en función de un indicador de responsabilidad adecuado en el sentido sistémico, nuestra responsabilidad para atender el problema climático es más alta de lo que algunos parecen pensar.

DEUDA NATURAL DE PUERTO RICO POR EMISION ACUMULATIVA DEL GAS DE INVERNADERO CO2 DESDE 1900



•HAY UNAS 35 TONELADAS DE CARBONO ADICIONAL EN LA ATMOSFERA POR CADA RESIDENTE ACTUAL DE PR PRODUCTO DE LA ACTIVIDAD ECONOMICA EN EL PAIS A PARTIR DEL AÑO 1900.

•A UN COSTO DE REMOCION DE 3 CENTAVOS LA LIBRA, LA DEUDA EQUIVALE A 9 BILLONES DE DOLARES= DEUDA PUBLICA DE PR (GOBIERNO CENTRAL+ MUNICIPIOS)

Ref: Allocating responsibility for global warming: the natural debt index, Ambio, vol. 20, no.2, april 1991.

Muchas opciones de acción individual y colectiva están abiertas para ayudar a restablecer la salud de Gaia. Lo importante es que tenemos que superar nuestra tendencia a esperar para actuar hasta que algo se compruebe que presenta un riesgo inaceptable. Esto que pudo ser adecuado en el preantropoceno no lo es ante la emergencia planetaria que vivimos

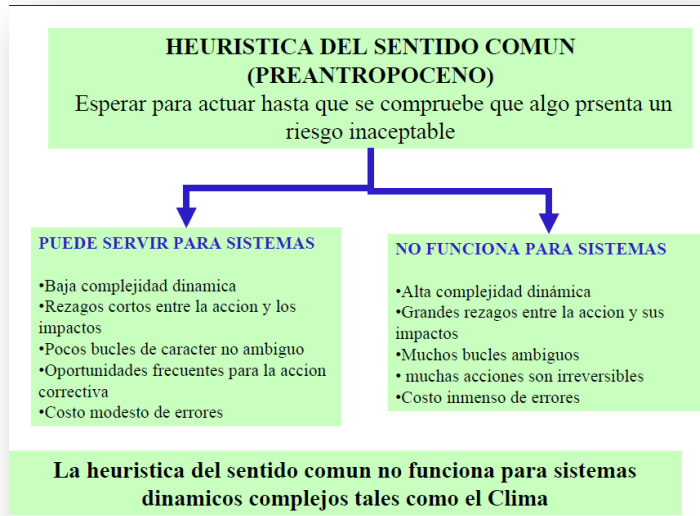
a comienzos del antropoceno. Los sistemas que hemos creado los humanos son de alta complejidad dinámica, de múltiples bucles de realimentación y con rezagos

importantes entre causas y efectos. Esperar para que el daño se demuestre antes de actuar nos puede llevar a cometer errores muy costosos e irreversibles, como en cierta medida ya ha sucedido con el problema climático.

Ante la escala y el momentum de la presencia humana en Gaia sería poco sabio no asumir el Principio de Precaución en nuestra interacción con Gaia: *cuando una actividad*

humana presenta peligros potenciales a la operación de Gaia, la ausencia de certeza científica no se deberá usar como excusa para no tomar medidas de precaución si el riesgo de no hacer nada es mayor que el riesgo de las medidas de precaución. No hacer nada nos puede llevar a la situación trágica del humano que venía cayendo desde un décimo piso y que al pasar por el segundo piso exclamo “Hasta ahora vamos bien”. Implantaremos correctamente ese principio si aprendemos a combinar en justa proporción la audacia y el conocimiento. El conocimiento sin audacia es inútil, la audacia sin conocimiento es peligrosa. No aplicar este principio nos está acercando a un “tipping point” climático, un punto en el que el sistema dinámico climático pasa a ser dominado por bucles de realimentación positivos que se autoreforzan y entonces no solo las oportunidades para tomar medidas de precaución desaparecen sino que eliminamos también las oportunidades para la remediación.

No debe confundirse la identidad o ser de un sistema con su estado o su estar. Un cambio de estado no cambia la identidad de un sistema. El gran educador Pablo Freire, en una ocasión indignado cuando sus colegas le señalaban que la pobreza era la realidad de Brasil les replicó:



PRINCIPIO DE PRECAUCION

Cuando una actividad humana presenta peligros potenciales a la operación de Gaia, la ausencia de certeza científica no se deberá usar como excusa para no tomar medidas de precaución si el riesgo de no hacer nada es mayor que el riesgo de las medidas de precaución

la realidad no es así, sino que está así, queriendo puntualizar que era susceptible de cambio. Un cambio que comienza en la esfera individual y que se desborda hacia la esfera pública. Un cambio de estado conlleva sistemodinamicamente un aumento o reducción en los acervos existentes del sistema, un cambio de identidad implica la desaparición y/o aparición de propiedades emergentes del sistema. Los humanos debemos buscar cambiar los acervos que manejamos para evitar a destiempo un cambio de identidad de Gaia que la haga incompatible con nuestra existencia. Ese a mi juicio es una de las enseñanzas más importantes de la geofisiología planetaria. Tradicionalmente si queríamos vivir, primero teníamos que aprender a sobrevivir. Hoy la crisis de Gaia tiende a alterar la situación tradicional, si queremos sobrevivir debemos empezar por aprender a vivir bien acoplados a Gaia.

El pesimismo hay que dejarlo para tiempos mejores. Nuestra generación aunque no deja atrás un mundo mejor al que conocimos de jóvenes, debe sentir aliento en que no veremos lo peor que pudo pasar. Piénsese en cómo hemos ido superando el problema del agotamiento del Ozono estratosférico y en la evitación del holocausto durante la llamada guerra fría mediante una guerra nuclear y males asociados como el del invierno nuclear. La ciencia nos ha provisto más recursos intelectuales y materiales que nunca antes para enfrentar las múltiples crisis simultáneas con que iniciamos el antropoceno. En conjunto con los valores adecuados, la ciencia es sin duda nuestra guía mas confiable para actuar. El sistema de valores adecuado supone reconocer que una sociedad sustentable en el antropoceno es una en desarrollo cultural permanente pero en equilibrio poblacional y económico. Nosotros los humanos, como dice Lovelock, somos el sistema nervioso de Gaia .El reto es movilizar a tiempo nuestro acervo de capacidades para que sirvamos de vehículos de auto-sanación de Gaia.

Citación de este artículo:

Medín Molina, J. (2009). Una apreciación sistemodinámica de Gaia. *Revista Umbral*, 1, 119-137. Disponible en <http://ojs.uprrp.edu/index.php/umbral/article/download/42/26>

Producción y Recursos en Internet:

Producción de Umbral, Facultad de Estudios Generales, Universidad de Puerto Rico, Río Piedras. Disponible en <http://umbral.uprrp.edu/revista>